

SYLVICULTURE, CROISSANCE ET PRODUCTION DE L'ÉPICÉA DE SITKA. PREMIERS RÉSULTATS DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL D'ÉCOUVES (ORNE)

FRANÇOIS COURBET - NICOLAS LAUGIER - HELFRIED OSWALD
MICHEL RAVART - FRÉDÉRIC JEAN

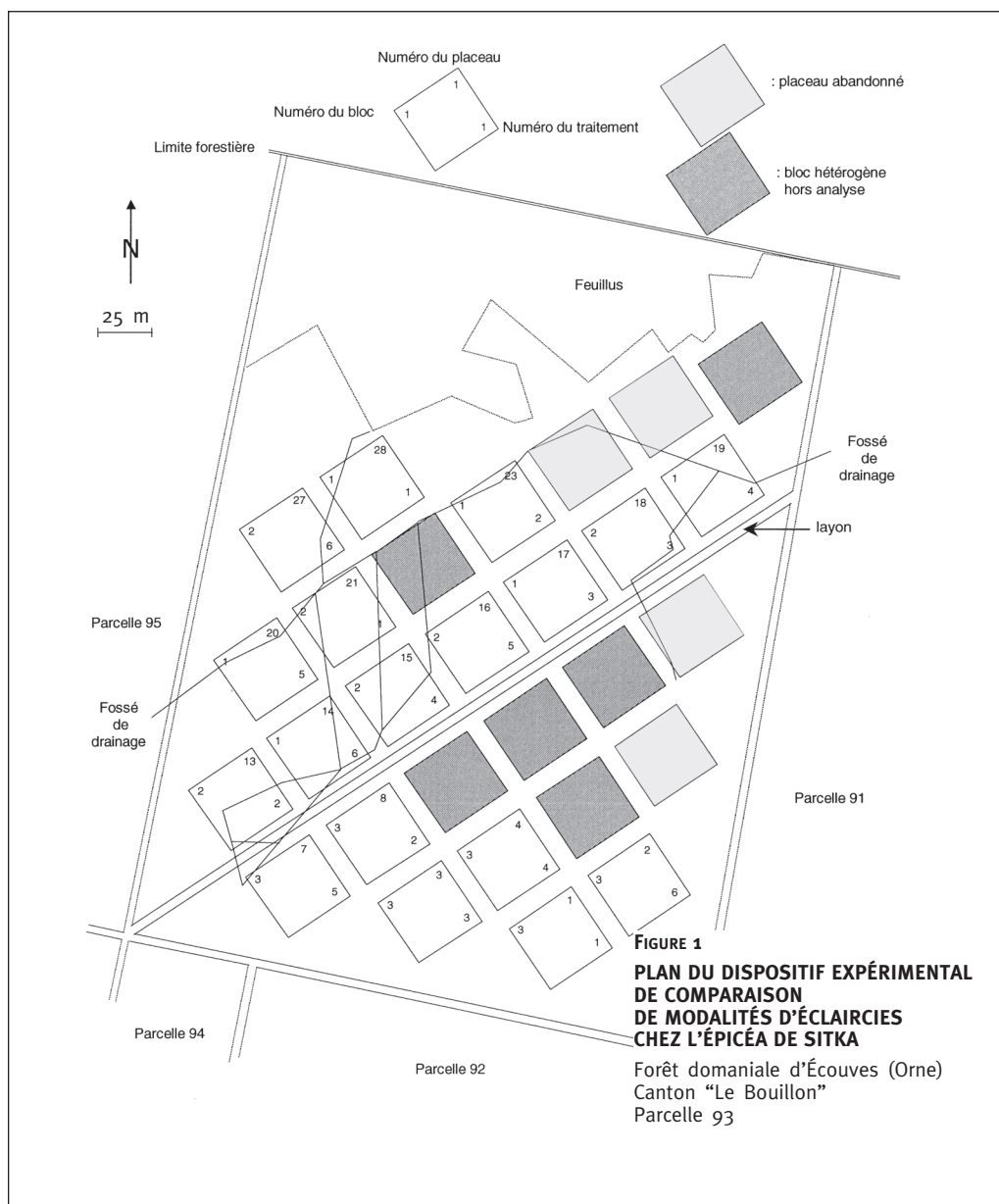
L'Épicéa de Sitka est originaire de la côte Ouest de l'Amérique du Nord, où on le trouve sur une étroite bande côtière qui s'étend de l'Alaska au Nord de la Californie. Il a été largement introduit en France en reboisement dans les régions à climat océanique marqué. La plupart des reboisements ont été faits sous l'impulsion du Fonds forestier national de 1960 à 1990. D'après les résultats les plus récents de l'Inventaire forestier national, cette essence couvre maintenant près de 50 000 ha, dont 88 % en forêt privée, essentiellement répartis en Bretagne, Normandie, Limousin et au sud du Massif central.

Sa croissance est très rapide et seuls le Pin de Monterey (*Pinus insignis*) et le Sapin de Vancouver (*Abies grandis*) peuvent le surpasser. Ce dernier est toutefois très sensible aux fentes de sécheresse, défaut majeur qui affecte principalement les plus gros arbres (Oswald et Aussenac, 1987 ; Boulet-Gercourt et Nepveu, 1988). L'Épicéa de Sitka est une solution intéressante pour la mise en valeur de sols acides, pauvres et plus ou moins hydromorphes (du pseudogley podzolique au sol tourbeux). Il est par contre sensible à *Heterobasidion annosum*, qui provoque la pourriture du cœur. Parmi ses ravageurs potentiels, on compte surtout un défoliateur : le Puceron vert (*Liosomaphis abietinum*) et un scolyte : le Dendroctone (*Dendroctonus micans*). Du fait de son enracinement superficiel, il est sensible aux chablis. Il est aussi plus sujet aux volis que le Douglas ou le Mélèze mais moins que l'Épicéa commun ou le Pin sylvestre (Riou Nivert, 2001). La stabilité des peuplements dépend aussi de la sylviculture : le risque de dégâts augmente en l'absence d'éclaircie ou à la suite d'éclaircies trop tardives (Tourret, 1989).

L'extension de l'Épicéa de Sitka en France est donc assez récente. Si les connaissances sur l'élevage des plants et les techniques de reboisement ne font plus défaut, on manque de recul pour conseiller de façon précise le sylviculteur sur la conduite des peuplements. Des tables de production existent néanmoins pour la Bretagne, région où l'Épicéa de Sitka est la première essence de reboisement avec 20 000 ha (Courbet, 1987). Ces tables ont été établies à partir de mesures réalisées dans des placettes temporaires, installées dans des peuplements soumis à des éclaircies plus ou moins fortes et précoces. Cette sylviculture a de plus évolué au cours du temps : forte densité de plantation, éclaircies faibles et tardives pour les peuplements âgés ; plantation à plus faible densité (1 100 à 1 320 plants à l'hectare en général) suivie d'éclaircies précoces, fortes et rapprochées pour les jeunes peuplements. Or, la sylviculture simulée dans les tables bretonnes maintient les peuplements à faible densité tout au long de leur vie et sort donc du domaine de la sylviculture observée pour les vieux peuplements : les tables ne rendent donc que

partiellement compte de l'évolution constatée. C'est pourquoi les expérimentations sylvicoles sur le long terme gardent toute leur valeur et restent indispensables pour l'établissement et la validation de modèles de prévision de la croissance et de la production.

En 1966, à l'instigation d'Helfried Oswald, la Station de sylviculture et de production de l'INRA de Nancy a installé un dispositif important de comparaison de traitements sylvicoles dans une jeune plantation de la forêt domaniale d'Écouves dans l'Orne. Le but de cet article est de présenter et discuter les premiers résultats de ce dispositif obtenus après 30 années de mesures régulières.



MATÉRIEL ET MÉTHODES

Le dispositif mis en place

Le dispositif, déjà brièvement évoqué dans cette même revue (Serrière-Chadœuf, 1986), est situé dans une légère dépression (pente moyenne de 5 %) dans la partie nord-est du massif d'Écouves, à 15 km au nord d'Alençon (Orne) et à une altitude moyenne de 290 m. Il a été installé dans une jeune plantation, faite fin 1961 sous abri à un espacement régulier de 2,5 m entre les lignes et de 2 m sur les lignes, soit une densité de 2 000 plants à l'hectare. Les plants, de provenance malheureusement inconnue et de catégorie US, A et B, étaient âgés de quatre ans ($2 + 2$).

La parcelle se trouve sur colluvions de grès armoricain au contact de formations argileuses du Cambrien (BRGM, 1982). Selon l'épaisseur des colluvions ou la proximité de l'argile imperméable, on distingue deux types de station forestière bien différenciés par le niveau d'hydromorphie du sol (Jabiol, 1982). La limite entre ces deux types suit à peu près le layon traversant la parcelle du sud-ouest au nord-est (figure 1, p. 68).

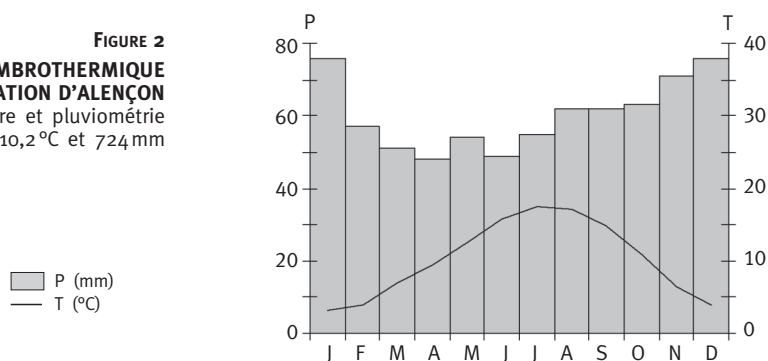
Le type de station 1, au sud-est de ce layon, est plus pauvre : il se caractérise par un sol peu profond de type pseudogley podzolique à hydromorphie temporaire et une végétation composée de Molinie, Callune, Fougère Aigle, Myrtille. L'abri initial, peu dense, était formé de Bouleaux, Saules et jeunes Pins sylvestres.

Le type de station 2, au nord-ouest du layon, est caractérisé par un sol moins superficiel de type stagnogley à hydromor ou à évolution tourbeuse avec une végétation de sphaignes là où la nappe est permanente. La mise en place d'un réseau de fossés, puis le développement du peuplement ont progressivement drainé le sol. L'abri initial, assez dense par endroits, était composé de feuillus (Bouleaux, Saules et quelques cépées de Hêtres et de Chênes).

Le climat se rapproche de celui indiqué par la station d'Alençon (figure 2, ci-dessous), située à l'abri du massif d'Écouves à 140 m d'altitude. Les précipitations sur la forêt sont sans doute supérieures, compte tenu de la différence d'altitude. Le climat est de type océanique marqué, convenant particulièrement à l'Épicéa de Sitka.

Après enlèvement de l'abri, 28 placettes de 14 ares environ (37,5 m x 37,5 m) ont été installées en 1966, entourées d'une bande d'isolement de 5 m de large autour de chacune d'entre elles. En 1982, 6 traitements ont été définis, répétés dans 4 blocs complets et 4 placettes ont été abandonnées à cause d'une densité ou d'une croissance anormalement faible. L'ensemble du dispositif comprenait donc 24 placettes. Pour la présente analyse, nous avons écarté un des blocs, à fertilité trop hétérogène, composé de placettes installées sur l'un et l'autre des deux

FIGURE 2
DIAGRAMME OMBROTHERMIQUE
DE LA STATION D'ALENÇON
(température et pluviométrie
moyennes annuelles: 10,2°C et 724 mm)



types de station. Les trois autres blocs ont été redéfinis sur la base du classement en hauteur dominante des placettes en 1982 et des dégâts de la tempête de décembre 1999 qui a anéanti la placette 26. On peut noter que les placettes des blocs 1 et 2 sont aléatoirement distribuées sur le type de station 2 au nord-ouest du layon. Le bloc 3 se trouve entièrement situé sur le type de station 1, le plus pauvre (figure 1, p. 68).

Les traitements appliqués

L'absence, en 1982, de tables de production et de normes françaises de sylviculture a conduit l'INRA à utiliser comme référence les tables de production anglaises (Hamilton et Christie, 1971) et à tester des traitements originaux. Les traitements expérimentaux, partiellement définis en 1982, s'établissent comme suit :

- **traitement 1** : témoin. Seuls les arbres secs sont prélevés au fur et à mesure.



Photo 1

Vue générale
du dispositif,
dont la lisière
est apparente
au second plan.
Août 1981
Photo INRA Nancy



Photo 2

Placette 15.
Traitement 4.
Bloc 1.
Septembre 1998
Photo INRA Avignon

— **traitement 2** : éclaircies sélectives fondées sur un facteur d'espacement de Hart-Becking⁽¹⁾ constant et égal à 20 % après éclaircie suivant la norme des anciennes tables de production anglaises. Première éclaircie réalisée à 15 m de hauteur dominante.

— **traitement 3** : éclaircies localisées au profit de 250 arbres d'avenir prédésignés à l'hectare. En 1982, environ 2 arbres concurrents par arbre d'avenir ont été coupés et environ 1 en moyenne en 1993.

— **traitement 4** : traitement 3 complété par l'enlèvement des petites tiges dominées.

— **traitement 5** : éclaircies sélectives correspondant à la norme des tables anglaises (Hamilton et Christie, 1971) en surface terrière : $G = 0,8H_o + 15 \text{ m}^2$ après éclaircie. Première éclaircie réalisée à 15 m de hauteur dominante.

— **traitement 6** : première éclaircie systématique enlevant une ligne sur 2. Deuxième éclaircie sélective enlevant environ 50 % des tiges restantes.

Les traitements 2 et 5 se caractérisent par des éclaircies faibles et très semblables, basées sur la sylviculture des tables de production anglaises. Ce sont les seuls traitements pour lesquels le nombre de tiges, ou la surface terrière, évoluent en fonction de la hauteur dominante. Les traitements 3 et 4, moins denses, se différencient plus par l'évolution du nombre de tiges que de la surface terrière. On veut ainsi tester l'influence du maintien ou de la suppression des tiges dominées sur la croissance du peuplement maintenu sur pied. De tous les traitements, le traitement 6 est celui qui présente les éclaircies les plus fortes.

En 1982, seules les placettes soumises aux traitements 3, 4 et 6, non définis par rapport à la hauteur dominante, ont fait l'objet d'une première éclaircie. Les placettes des traitements 2 et 5 ont été éclaircies dès que leur hauteur dominante a atteint 15 m, ce qui a été le cas en 1985 pour les placettes 13, 20 et 23, en 1988 pour la placette 16 et en 1993 pour les placettes 7 et 8, toutes les autres placettes passant alors en deuxième éclaircie cette même année. La figure 3 (p. 72) permet de visualiser l'effet des traitements sur la diminution du nombre de tiges dans le bloc 1.

En 1985, tous les arbres ont été élagués jusqu'à 2 m de hauteur. Cet élagage a surtout supprimé des branches sèches.

Les données relevées

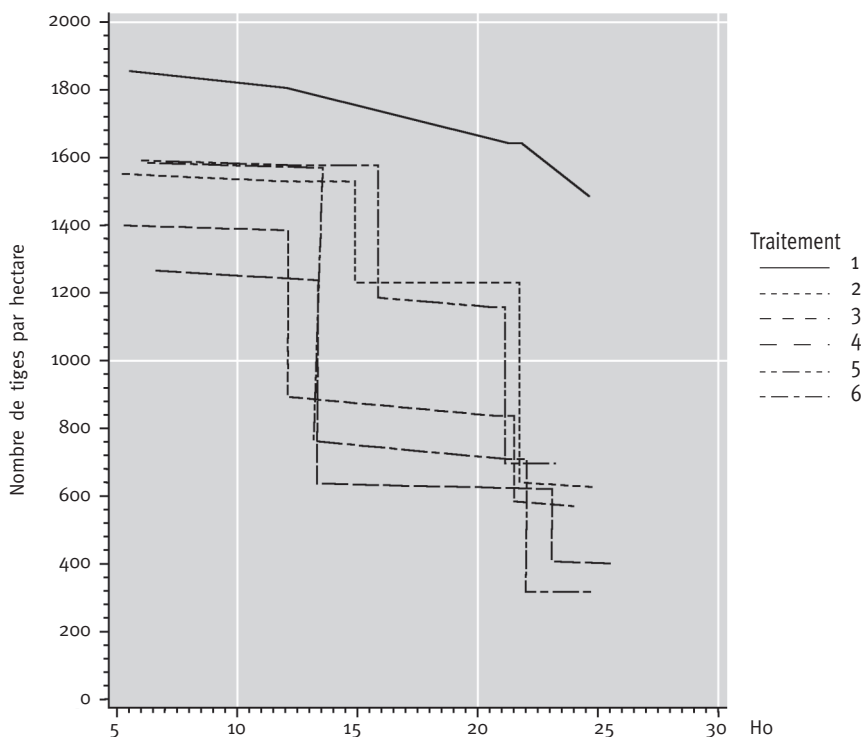
Les âges indiqués sont calculés en nombre de saisons de végétation depuis la germination des graines. La position de chaque arbre a été relevée et cartographiée. L'inventaire en plein des hauteurs totales a été fait en 1967 et 1974. Celui des circonférences à 1,30 m a été fait en 1974, 1982, 1985, 1988, 1992, 1993 et 1998. Le niveau de mesure a été marqué à la peinture en 1982. En 1982, 1985 et 1988, les hauteurs totales ont été mesurées sur un échantillon d'arbres, répartis dans toutes les classes de diamètre pour les placettes éclaircies ces années-là, et sur 5 arbres dominants pour les placettes ne passant pas en éclaircie (dans ce cas, seule la hauteur dominante a pu être calculée). En 1992, 1993 et 1998, 15 arbres-échantillons par placette, couvrant la gamme de diamètres constatés, ont été mesurés en hauteur.

250 arbres par hectare ont été repérés comme arbres d'avenir dans les traitements 1, 3 et 4 en 1982 et dans toutes les autres placettes en 1998 sur la base des trois règles suivantes :

— arbre apparemment sain et sans défaut visible,

(1) Le facteur d'espacement S de Hart-Becking est le rapport de l'espacement moyen des arbres à la hauteur dominante du peuplement H_o . $S = \frac{10746}{H_o \sqrt{N}}$ % avec N = nombre d'arbres par hectare, si l'on suppose une disposition des arbres en quinconce.

FIGURE 3 **IMPACT DU TRAITEMENT SUR L'ÉVOLUTION DU NOMBRE DE TIGES VIVANTES EN FONCTION DE LA HAUTEUR DOMINANTE. BLOC I**



- de diamètre en 1982 supérieur au diamètre moyen,
- espacement minimal de 5 m entre les arbres repérés.

Sur 311 arbres d'avenir repérés en 1982, 7 sont morts et ont dû être remplacés en 1993.

Les analyses effectuées

Les calculs ont été faits à partir des circonférences mais les résultats sont présentés en diamètres.

Les hauteurs moyennes (du peuplement et des arbres d'avenir) et dominante ont été calculées à partir du modèle exponentiel suivant, établi pour chaque placette, à chaque inventaire quand des mesures de hauteurs étaient disponibles : $H = b_0 + b_1 (1 - e^{-b_2 C})$ avec $C = C_a$ ou C_o , C_a et C_o étant respectivement la circonférence de l'arbre de surface terrière moyenne des 250 arbres d'avenir et des 100 plus gros arbres par hectare ; b_0 , b_1 et b_2 étant des paramètres tels que $0 \leq b_0 \leq 1,30$, b_1 et $b_2 \geq 0$.

Pour le calcul des volumes, le tarif de cubage utilisé est un tarif spécifique à deux entrées. Il donne le volume commercial tige bois fort sur écorce, arrêté à la découpe 7 cm de diamètre. Celui-ci a été construit essentiellement à partir de mesures d'arbres abattus en Bretagne mais

aussi de 127 arbres issus de l'éclaircie du dispositif en 1982 (Courbet et Pichard, 1986a, 1986b). La hauteur utilisée est la hauteur de chaque arbre calculée à partir de la circonférence mesurée et du modèle mentionné ci-dessus. Les volumes des arbres moyens sont les moyennes arithmétiques des volumes obtenus.

Dans cet article, nous présentons essentiellement les résultats qui intéressent plus directement le sylviculteur. Dans un premier temps, nous jugerons de l'effet de la fertilité et des traitements sur les variables réputées relativement indépendantes de la sylviculture (hauteur dominante, productions totales en volume et en surface terrière). Puis nous verrons l'effet de la fertilité et surtout des traitements sur les caractéristiques dendrométriques moyennes des arbres dominants et des arbres d'avenir. L'effet d'une éclaircie, par exemple sur le diamètre moyen d'un peuplement, peut se décomposer en deux parties. Si elle est sélective, elle a un effet technique immédiat qui, dans le cas d'une éclaircie par le bas, entraîne une augmentation du diamètre moyen par le simple fait de supprimer des arbres plus petits que la moyenne. Elle a ensuite un effet différé sur la croissance proprement dite : l'accroissement en diamètre augmente du fait de la diminution de la concurrence. Pour isoler cet effet, il faut donc comparer les caractéristiques moyennes de populations identiques, qui ne sont pas touchées par les éclaircies pratiquées : par exemple, la sous-population des arbres dominants ou bien celle des arbres d'avenir, repérés de la même façon dans chaque placette. Ces derniers sont en outre particulièrement importants pour les gestionnaires puisque c'est sur eux que se concentre l'essentiel de la valeur économique du peuplement. Les arbres dominants sont les 100 plus gros arbres à l'hectare, population approchée ici par les $n - 1$ plus gros arbres sur la placette de n arbres (Pardé et Bouchon, 1988).

L'analyse de variance permet de dégager un éventuel effet du traitement et un possible effet bloc sur une variable. En cas d'effet significatif, un test de comparaison de moyennes (test de Duncan) permet de distinguer les groupes homogènes de placettes ou au contraire les placettes qui se distinguent significativement des autres. Ces calculs ont été réalisés avec la procédure ANOVA du logiciel SAS.

RÉSULTATS

À titre d'exemple, le tableau I (ci-dessous) présente, pour le bloc le plus fertile (n° 1), la situation dendrométrique des placettes lors de la dernière mesure effectuée en 1998.

TABLEAU I **Récapitulatif des principales caractéristiques dendrométriques des placettes du bloc 1 en 1998**

Traitement	Placette	Âge	Ho m	Do cm	N/ha	Dg cm	Hg m	G m ² /ha	PTG ⁽¹⁾ m ² /ha	V m ³ /ha	PTV ⁽²⁾ m ³ /ha	Im ⁽³⁾ m ³ /ha/an	Ic ⁽⁴⁾ m ³ /ha/an	S %
1	28	41	24,65	32,8	1485	20,9	22,04	51,02	54,01	517,1	536,40	13,08	22,72	11,3
2	23	41	24,96	34,1	626	27,6	23,21	37,42	53,08	391,7	516,00	12,59	21,08	17,2
3	17	41	23,98	38,7	570	26,9	21,40	32,42	49,92	313,8	434,88	10,61	17,48	18,8
4	19	41	25,58	41,9	401	33,0	24,53	34,19	56,28	363,8	525,88	12,83	21,11	21,0
5	20	41	23,21	34,6	696	25,0	21,57	34,23	51,14	334,1	461,21	11,25	19,58	17,5
6	14	41	24,73	39,8	317	32,3	23,24	26,03	52,06	265,3	435,31	10,62	17,29	24,4

(1) production totale en surface terrière depuis l'origine.

(2) production totale en volume depuis l'origine.

(3) accroissement moyen annuel calculé depuis l'origine.

(4) accroissement courant annuel calculé sur la période 1993-1998.

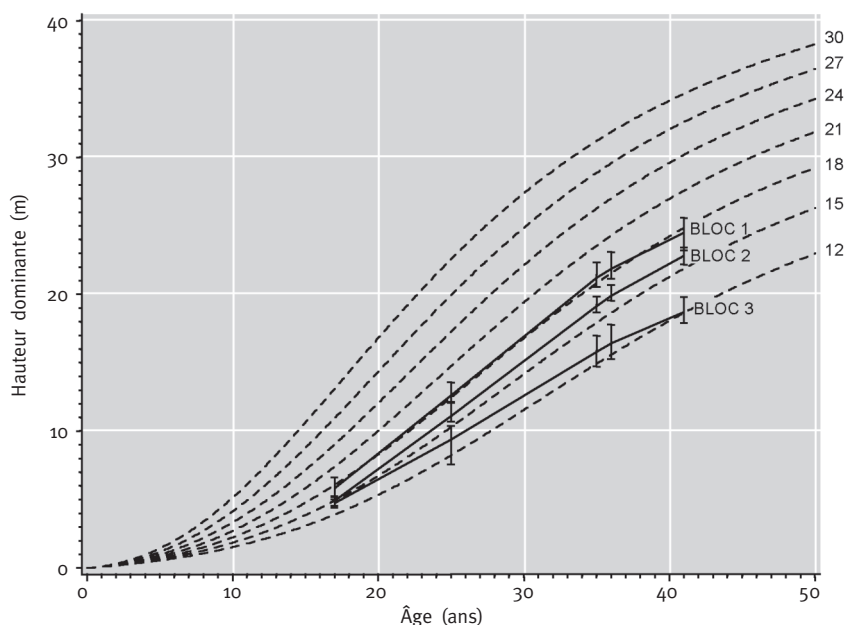
Fertilité et productivité

Afin de situer la fertilité des blocs les uns par rapport aux autres, nous avons superposé la croissance en hauteur dominante des placettes au faisceau des classes de productivité bretonnes (figure 4, ci-dessous). Les trois blocs se situent dans la moitié inférieure de ce faisceau. L'évolution des hauteurs dominantes des blocs 1 et 2, situés sur la station 1 dont la fertilité est meilleure, est semblable aux courbes modélisées. Par contre, le bloc 3, complètement implanté sur la station 2 la plus pauvre, et assez proche des deux autres blocs en 1974, s'en écarte nettement et progressivement jusqu'en 1998. Les blocs 1 et 2, situés sur le même type de station, sont effectivement de fertilité voisine (figure 1, p. 68).

FIGURE 4

CROISSANCE EN HAUTEUR DOMINANTE DES 3 BLOCS (moyenne, minimum et maximum)

Situation par rapport aux modèle et classes de productivité établis pour la Bretagne (Courbet, 1987).
Chaque classe de productivité est repérée par son accroissement moyen maximum en $\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$



La production totale en volume des placettes en fonction de la hauteur dominante semble relativement bien suivre une courbe unique (figures 5a et 5b, p. 75), conformément à la loi élargie de Eichhorn. Les fertilités (blocs) sont bien réparties aléatoirement ainsi que les traitements, mis à part le traitement 6 où apparaît une légère perte de production. Cette relation est bien en dessous de la courbe tirée des tables de Bretagne, confirmant les observations réalisées sur d'autres espèces, qui montrent une augmentation de la productivité, pour une même hauteur dominante, au fur et à mesure qu'on se rapproche de l'océan. En effet, sous climat océanique, doux et pluvieux, les arbres peuvent profiter d'une saison de végétation plus longue, si l'eau est disponible, pour continuer à pousser en grosseur alors que leur croissance en hauteur est terminée. Il est possible aussi que le taillis, exploité 5 ans après la plantation puis recépé parfois tardivement et dont la production n'a pas été prise en compte, puisse expliquer une partie du déficit constaté. L'accroissement moyen à 41 ans varie selon les placettes de 5 à $13,1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$, ce qui est faible pour l'Épicéa de Sitka.

FIGURE 5 PRODUCTION TOTALE EN VOLUME EN FONCTION DE LA HAUTEUR DOMINANTE SELON LES TRAITEMENTS (a) ET LES BLOCS (b)
Ajustement ($V(\text{tot}) = 1,09 (H_o - 3)^{1,98}$) et comparaison avec les tables de production bretonnes

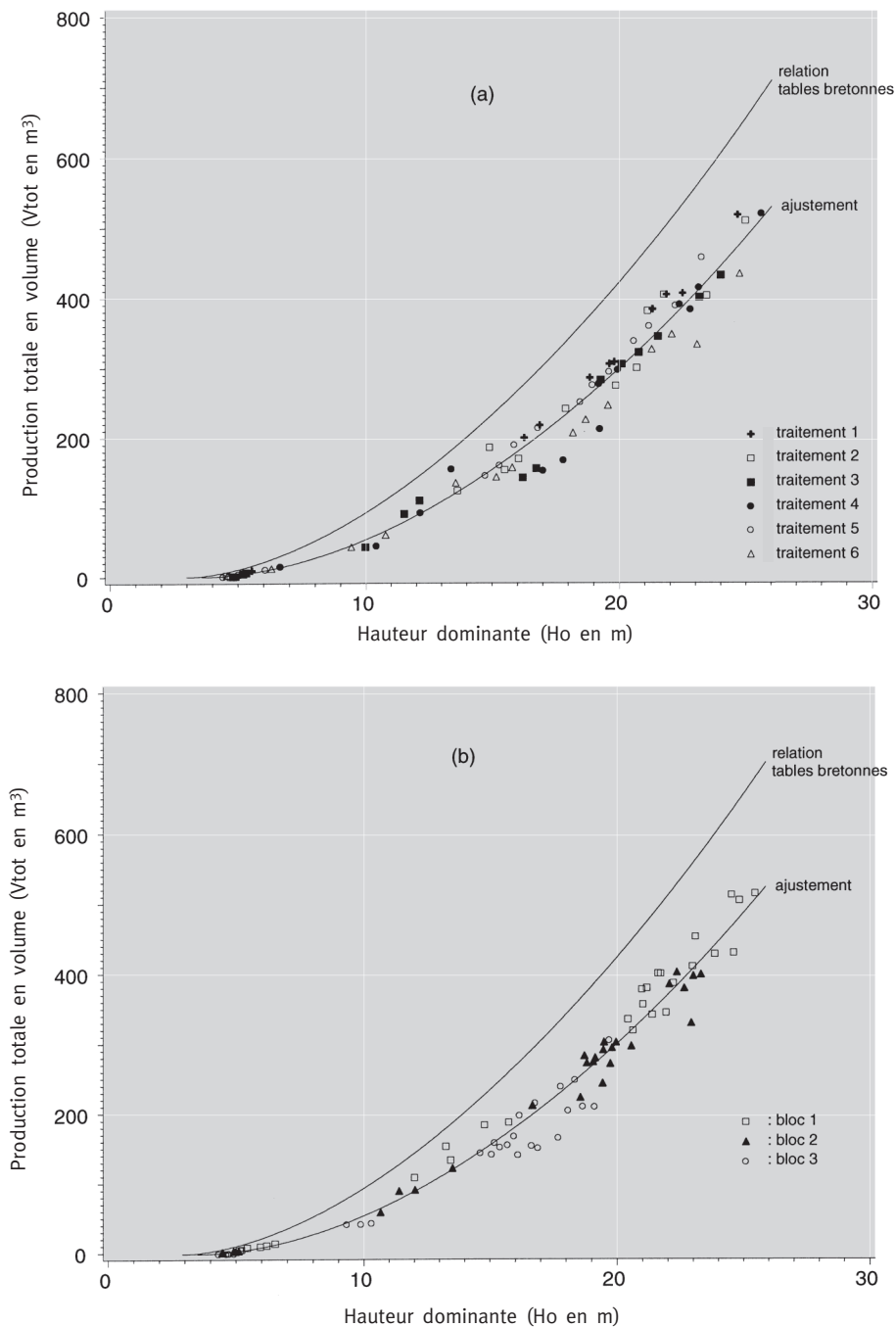
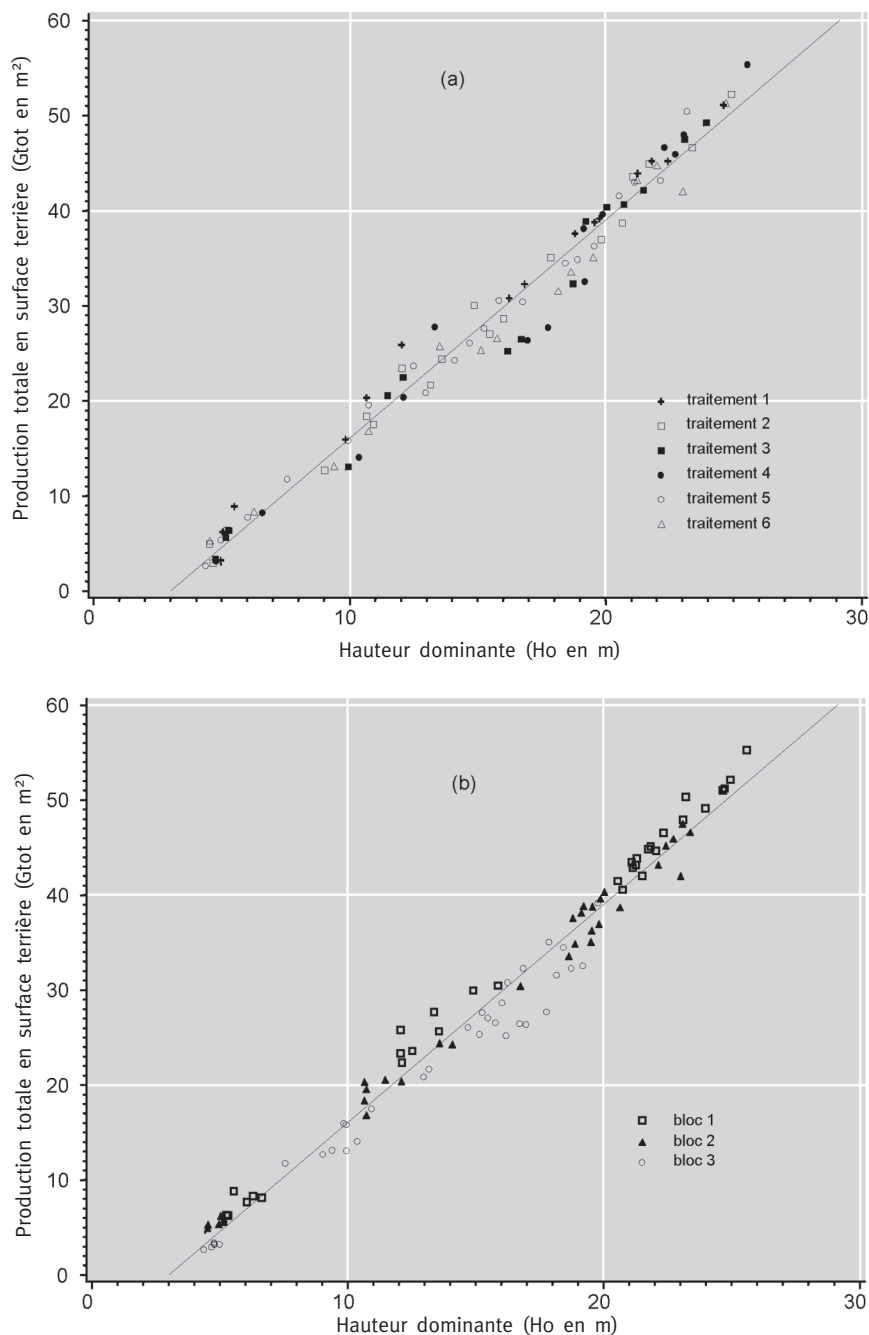


FIGURE 6 PRODUCTION TOTALE EN SURFACE TERRIÈRE EN FONCTION DE LA HAUTEUR DOMINANTE
POSITION DES TRAITEMENTS (a) ET DES BLOCS (b)
 Ajustement ($G(\text{tot}) = -7,04 + 2,3 H_0$)



La surface terrière a l'inconvénient de moins "parler" au forestier que le volume, sur lequel se basent les transactions commerciales. Elle a pourtant sur ce dernier l'avantage de pouvoir être mesurée avec une très bonne précision, et de ne pas devoir être estimée par un tarif. La production totale en surface terrière est ici une fonction linéaire simple de la hauteur dominante (figures 6a et 6b, p. 76). Les traitements sont bien répartis aléatoirement, sauf le traitement témoin qui a une production légèrement supérieure à celle des autres traitements. Par contre, cette relation semble bien dépendre du bloc. Plus le bloc est fertile, plus la production totale en surface terrière est forte pour une même hauteur dominante, bien que les différences ne soient pas importantes. On peut parler ici, comme Hamilton *et al.* (1981), de différents niveaux de production en surface terrière à hauteur dominante égale.

L'influence de la fertilité sur la productivité se confirme quand on compare les caractéristiques moyennes des arbres d'avenir par bloc, tous traitements confondus (tableau II, ci-dessous). L'effet est particulièrement net sur le volume qui est deux fois plus important dans le bloc 1 que dans le bloc 3 pour une différence de hauteur dominante de près de 6 m au même âge.

TABEAU II **Récapitulatif des principales caractéristiques dendrométriques des arbres d'avenir, en moyenne sur chacun des 3 blocs en 1998**

Résultats du test de Duncan de comparaison des moyennes par bloc :
les blocs affectés d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5 %

Bloc	Âge	Ho m	$\Delta Ho^{(3)}$ m	Do cm	Da ⁽¹⁾ cm	$\Delta Da^{(3)}$ cm	Ha ⁽¹⁾ m	Ga/ha ⁽²⁾ m ² /ha	Va ⁽¹⁾ m ³	$\Delta Va^{(3)}$ m ³ /an	Va/ha ⁽²⁾ m ³ /ha	$\Delta Va/ha^{(3)}$ m ³ /ha/an
1	41	24,52 A	0,59 A	37,0 A	32,5 A	0,80 A	23,80 A	20,19 A	0,87 A	0,052 A	212,82 A	12,59 A
2	41	22,84 B	0,53 AB	34,1 A	30,1 A	0,78 A	22,11 B	17,05 A	0,70 B	0,047 A	170,88 B	11,48 A
3	41	18,72 C	0,46 B	29,1 B	25,1 B	0,67 A	17,78 C	12,12 B	0,40 C	0,027 B	98,43 C	6,62 B

(1) Da, Ha, Va représentent respectivement le diamètre, la hauteur et le volume moyens des arbres d'avenir.

(2) Ga/ha, Va/ha représentent la surface terrière et le volume moyens à l'hectare des arbres d'avenir.

(3) ΔHo , ΔDa , ΔVa et $\Delta Va/ha$ représentent les accroissements courants annuels des variables considérées, calculés sur la période 1993-1998.

Influence des traitements sur la croissance

Afin de pouvoir juger de l'effet réel de la diminution de la densité sur la croissance et s'affranchir de l'effet technique de l'éclaircie sélective, nous nous sommes donc intéressés à l'effet des traitements sur les caractéristiques moyennes des arbres dominants et des arbres d'avenir.

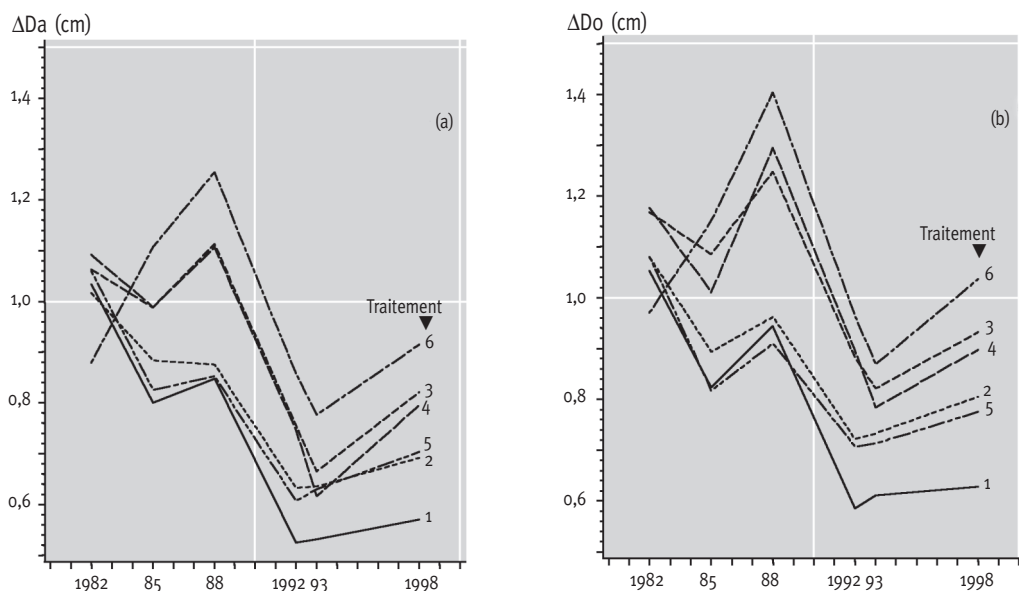
L'effet du traitement sur l'accroissement en diamètre est très marqué, confirmant la sensibilité de cette variable à la concurrence. Cet effet se manifeste aussi bien sur la croissance des arbres d'avenir (figure 7a et tableau III, p. 78) que sur celle des arbres dominants (figure 7b et tableau III, p. 78). On retrouve l'influence de la densité sur le diamètre dominant déjà notée par Dhôte (1997) sur Chêne sessile et Hêtre. Selon leur réponse, 16 ans après la réalisation des premières éclaircies, les 6 traitements peuvent clairement se classer en 4 groupes :

- le traitement témoin sans intervention qui manifeste la plus faible croissance en diamètre ;
- les traitements 2 et 5 dont nous avons vu qu'ils sont assez semblables dans leur définition, ce qui se confirme au plan de leur effet sur la croissance en diamètre ;
- les traitements 3 et 4, à éclaircies plus fortes. Il n'y a pas de différence significative entre ces deux traitements. L'enlèvement des petites tiges n'influence donc pas la croissance en diamètre des arbres d'avenir ;
- le traitement 6, aux éclaircies les plus fortes. Sa croissance en diamètre qui, bien que significativement plus faible que celle des autres traitements en 1982 avant les interventions, est

la plus forte en 1998. Compte tenu des écarts entre traitements à l'origine, on peut estimer le gain sur la croissance en diamètre à environ 5 cm en 16 ans par rapport au témoin, pour le diamètre moyen des arbres d'avenir (figure 8a, p. 79) et des arbres dominants (figure 8b, p. 79).

La hauteur dominante, la hauteur moyenne des arbres d'avenir, ainsi que leurs accroissements en 1998 ne sont pas significativement différents entre traitements.

FIGURE 7 ÉVOLUTION DE L'ACCROISSEMENT ANNUEL DU DIAMÈTRE MOYEN ΔDa DES ARBRES D'AVENIR (a) ET DU DIAMÈTRE DOMINANT ΔDo (b) EN FONCTION DU TRAITEMENT

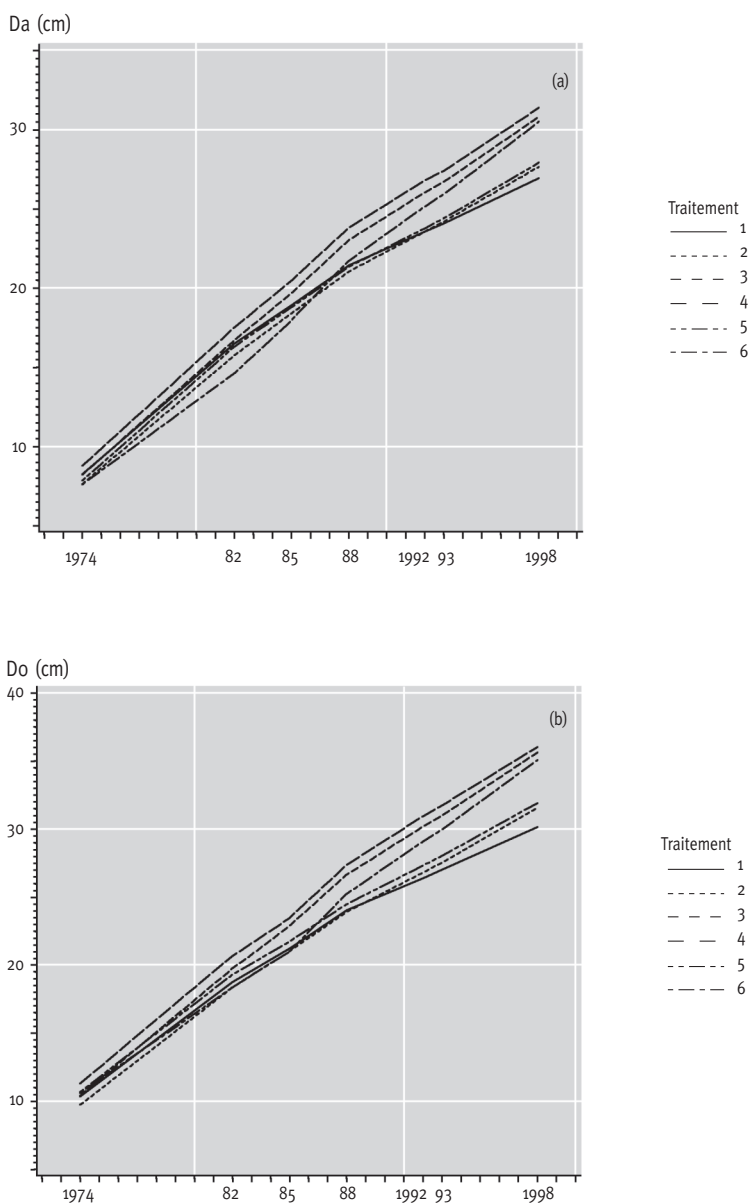


TABEAU III Principales caractéristiques dendrométriques des arbres d'avenir en 1998 selon les traitements: diamètre dominant Do , diamètre moyen Da , volume moyen Va , volume à l'hectare (Va/ha) et leur accroissement annuel respectif calculé sur la période 1993-98: ΔDo , ΔDa , ΔVa , et $\Delta Va/ha$. Le classement retenu est celui obtenu pour ΔDa . Résultats du test de Duncan de comparaison des moyennes par traitement: les traitements affectés d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5%

Traitement	ΔDo (cm)	ΔDa (cm)	Do (cm)	Da (cm)	ΔVa (m ³ /an)	$\Delta Va/ha$ (m ³ /ha/an)	Va (m ³)	Va/ha (m ³ /ha)
6	1,04 A	0,91 A	35,09 A	30,51 AB	0,0496	12,08 A	0,70	170,55 AB
3	0,93 B	0,82 B	35,63 A	30,83 A	0,0461	11,31 AB	0,72	176,89 AB
4	0,90 B	0,79 B	36,04 A	31,40 A	0,0468	11,39 AB	0,77	188,81 A
5	0,78 C	0,70 C	31,93 B	27,93 BC	0,0375	9,14 BC	0,59	142,41 B
2	0,81 C	0,69 C	31,59 B	27,67 C	0,0377	9,32 BC	0,60	146,24 B
1	0,63 D	0,57 D	30,17 B	26,95 C	0,0332	8,16 C	0,56	139,35 B

Les hauteurs n'ayant pas été mesurées à chaque inventaire, les volumes ne sont disponibles pour chaque placette qu'en 1974, 1992, 1993 et 1998. La taille réduite des arbres en 1974 ne permet pas d'estimer précisément les volumes.

FIGURE 8 ÉVOLUTION DU DIAMÈTRE MOYEN D_a DES ARBRES D'AVENIR (a) ET DU DIAMÈTRE DOMINANT D_o (b) EN FONCTION DU TRAITEMENT



L'accroissement en volume des arbres d'avenir est d'autant plus important que les éclaircies pratiquées sont fortes, aboutissant à un classement des différents traitements conforme à nos attentes. Compte tenu des différences de productivité entre traitements à l'origine, le volume par hectare des arbres d'avenir discrimine surtout les traitements plus fortement éclaircis (3, 4 et 6) des autres (tableau III, p. 78).

La stabilité des arbres d'avenir, appréciée par le coefficient d'élancement H/D et inversement proportionnelle à celui-ci, n'est pas significativement différente selon les traitements avant la première éclaircie (1974). Son évolution aboutit à une sensibilité plus grande au risque de chablis en 1998 dans le témoin et les traitements les moins éclaircis (tableau IV, ci-dessous). On peut noter une stabilisation de ce rapport de 1993 à 1998 suite à l'éclaircie faite dans toutes les placettes. La superposition des courbes de hauteur aux abaques du rapport H/D permet en outre de situer chaque classe de diamètre par rapport à ce facteur de risque (figure 9, ci-dessous).

TABLEAU IV **Évolution du rapport H/D moyen des arbres d'avenir selon les traitements.**

Résultats du test de Duncan de comparaison des moyennes par traitement : les traitements affectés d'une même lettre ne sont pas significativement différents au seuil de 5%.

Les traitements sont ordonnés en fonction de leur classement en 1998.

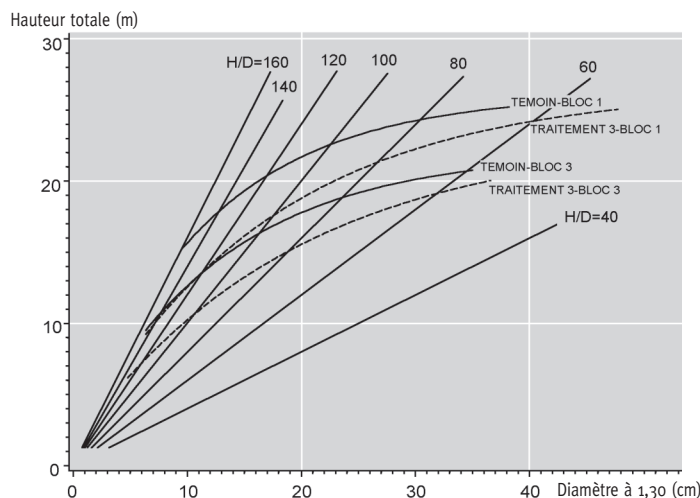
Ne figurent que les variables qui ont été mesurées dans tous les traitements l'année considérée.

Traitement	H/D_{74}	H/D_{93}	H/D_{98}
1	55,60 A	78,20 A	80,33 A
2	54,27 A	76,80 A	76,40 AB
5	54,93 A	73,53 AB	74,40 B
4	54,93 A	70,60 B	68,93 C
6	55,13 A	70,47 B	68,73 C
3	53,40 A	69,73 B	68,27 C

FIGURE 9

COURBES DE HAUTEUR ET RAPPORTS H/D

Position des traitements 1 (témoin) et 3 des blocs 1 et 3.
Les courbes de hauteur couvrent le domaine des diamètres présents



La fertilité est par contre sans influence sur le coefficient d'élancement (absence d'effet bloc). Une notation rapide des dégâts de la tempête de décembre 1999 a montré que les dommages dans les placettes analysées étaient faibles (entre 0 et 10 % des tiges déracinées ou cassées) et indépendants de la sylviculture. Les placettes les plus hautes ont subi davantage de dommages, mais elles étaient aussi plus exposées au vent d'ouest. À noter que la placette 26, de 26,24 m de hauteur dominante et non analysée ici, a été complètement anéantie.

Sylviculture et largeur de cerne

La largeur de cerne est un critère important qui conditionne étroitement l'utilisation du bois d'Épicéa de Sitka. Les études anciennes et récentes menées par le Centre technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA) ont montré une liaison étroite entre la largeur moyenne des cernes et les caractéristiques de résistance mécanique des pièces en dimension d'emploi (Nepveu et Blachon, 1989 ; CTBA, 1998). Une croissance trop rapide peut lui fermer un certain nombre de débouchés valorisants, notamment l'emploi en structure.

Suite à une étude récente, l'Épicéa de Sitka a été introduit dans la nouvelle norme de classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses (AFNOR, 1998). Cette norme indique les critères de classement visuel (largeur des cernes, taille maximale des nœuds, pente du fil, altérations diverses, flaches et déformations des pièces...). L'influence de la sylviculture peut être importante pour un certain nombre de ces critères. D'une part, parce que les éclaircies sélectives permettent d'éliminer les arbres moins bien conformés. D'autre part, en jouant sur l'évolution de la densité du peuplement et donc sur la concurrence, les éclaircies ont un effet direct sur la largeur des cernes et le diamètre des branches donc des nœuds.

Nos données sont insuffisantes pour permettre de classer les volumes obtenus selon les critères définis dans la norme, du fait surtout de l'absence de mesure de diamètre de branche ou de nœud.

Il nous a pourtant semblé intéressant d'évaluer l'influence des traitements sylvicoles et de la fertilité sur la largeur de cerne. Nous avons pour cela utilisé les données individuelles de croissance des arbres d'avenir. Tous les cernes à 1,30 m ont été pris en compte de 1974 à 1998. Les largeurs moyennes ont été calculées sur des groupes de 5 à 8 cernes selon les inventaires disponibles. Le classement de chaque arbre et de son volume est effectué sur la base du maximum de ces moyennes de largeurs. La figure 10 (p. 82) visualise, selon les blocs et les traitements, la répartition du volume des arbres d'avenir en 1998 par classe de largeur de cerne limitée par les valeurs indiquées dans la norme ou recommandées par le CTBA :

- 10 mm, limite au-delà de laquelle on rejette le classement en structure ;
- 8 mm, limite séparant l'utilisation en charpente traditionnelle de l'utilisation en charpente industrielle ;
- 6 mm, limite préconisée par le CTBA (Chollat et Guillot, 1998 ; Veyron, 1999) et en deçà de laquelle il pourrait être utilisé en lamellé-collé.

Il ne s'agit pas d'un classement de qualité selon la norme en vigueur. D'une part parce que la largeur de cerne n'est pas le seul critère à prendre en compte. Mais aussi parce que le classement réel s'effectue sur les débits, et non sur les bois ronds, en fonction de la largeur moyenne des seuls cernes présents sur leur section. En outre, l'étude CTBA a mis en évidence un effet hauteur du billon : la largeur moyenne des cernes augmente avec la hauteur dans l'arbre (Chollat et Guillot, 1998). Or, les sections des avivés éventuels peuvent être localisées dans l'empatement ou dans le haut des tiges, assez loin du niveau 1,30 m seul pris en compte ici. Néanmoins, la figure 10 (p. 82) donne des indications utiles qui permettront au gestionnaire d'orienter ses choix sylvicoles. En effet, on retrouve un effet net de la fertilité et des éclaircies sur cette répar-

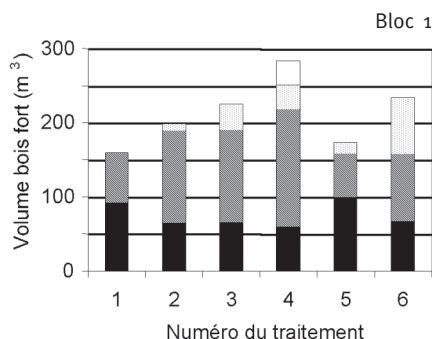
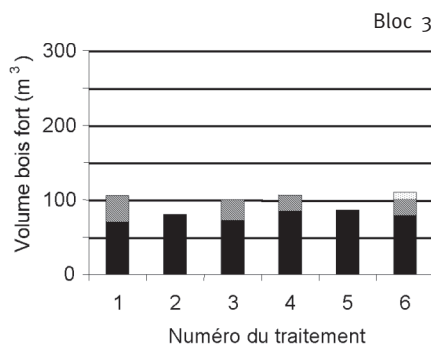
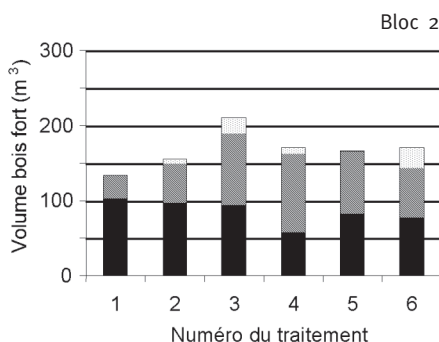
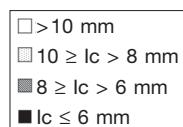


FIGURE 10
RÉPARTITION DU VOLUME 1998 DES ARBRES D'AVENIR
 en classes de valeur maximale
 de moyennes de largeurs de cernes
 calculées sur des groupes de 5 à 8 cernes à 1,30 m



tition selon les largeurs de cerne, les traitements 3, 4 et 6 augmentant sensiblement la largeur moyenne des cernes des arbres d'avenir.

Un travail important reste à faire pour aboutir à un véritable classement selon les qualités définies dans la norme du CTBA. On manque en particulier de données sur l'importance de la branchaison et la répartition en trois dimensions des largeurs de cernes dans l'arbre. Compte tenu de la situation des placettes dans les classes de fertilité les plus faibles, les données présentées, bien qu'incomplètes, permettent d'affirmer qu'il existe un risque que, dans certaines conditions (sylviculture à faible densité sur bonne station), le bois produit soit en partie exclu de l'emploi en structure à cause d'une largeur de cerne excessive.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Surtout situé en forêt privée, l'Épicéa de Sitka est souvent choisi par les reboiseurs pour sa forte productivité, dans des stations trop humides et pauvres pour convenir à des essences plus valorisantes. L'intérêt économique est fréquemment la motivation principale du gestionnaire de peuplements d'Épicéas de Sitka. Dans ce cadre, on peut chercher à raccourcir la révolution par l'application d'une sylviculture à faible densité qui permettra d'atteindre le plus rapidement possible un diamètre d'exploitabilité suffisant, tout en limitant les risques de chablis par la diminution de l'élancement des tiges. Deux risques sont pourtant liés à cette sylviculture :

- des éclaircies trop fortes peuvent entraîner une perte de production totale. Nous avons vu que cette perte concernait uniquement le traitement 6. Elle reste faible et concerne des produits dont la valeur aurait sans doute été faible. Le manque à gagner de ce côté est sans

doute largement compensé par le gain apporté par l'éclaircie à l'accroissement en diamètre, sachant que le prix au mètre cube augmente avec le volume de l'arbre moyen ;

— un effet défavorable sur la qualité du bois, par l'augmentation de la taille des nœuds et de la largeur des cerne. En l'absence de données sur le diamètre des branches, nous avons montré que l'influence de l'intensité des éclaircies et surtout de la fertilité est forte sur la largeur des cerne.

On peut craindre que l'utilisation de l'Épicéa de Sitka sur de meilleures stations que celles de ce dispositif, associée à des éclaircies fortes dans le jeune âge, n'exclue un volume de bois important de l'utilisation en structure. Il convient donc d'être prudent et de lui préférer, sur bon sol, le Douglas pour lequel les fortes largeurs de cerne sont moins pénalisantes en terme de classement (AFNOR, 1998) ou des espèces à croissance moins rapide. Il serait souhaitable de disposer de données individuelles d'accroissement dans des dispositifs sylvicoles situés sur de bonnes stations pour déterminer si une sylviculture à plus forte densité peut contrebalancer efficacement l'effet technologiquement défavorable des meilleures stations sur la largeur de cerne.

On voit tout l'intérêt qu'il y aurait à disposer d'un modèle de croissance de type arbre indépendant des distances, valable dans des conditions de fertilité, d'âge et de densité variés pour réaliser des simulations permettant de lever ces interrogations (Houllier *et al.*, 1991). Les données françaises d'accroissement individuel, dont l'essentiel vient du dispositif d'Écouves, ne sont pas suffisantes pour l'instant et des collaborations internationales, notamment avec la Grande-Bretagne et l'Irlande qui ont beaucoup reboisé en Épicéa de Sitka, doivent être recherchées.

Le dispositif d'Écouves qui est, à notre connaissance, le seul du genre en France, continuera d'être suivi en faisant diverger les traitements par trop semblables (le traitement 2 du traitement 5, et le traitement 3 du traitement 4). Des mesures complémentaires sur la branchaison seront en outre effectuées à l'occasion des prochaines éclaircies.

Dans cet article, nous nous sommes focalisés sur l'influence des traitements et de la fertilité sur les caractéristiques dendrométriques moyennes d'arbres dominants ou codominants. D'autres analyses suivront, notamment sur l'évolution de la mortalité naturelle, sensible dans les placettes témoin, ou du rang social des arbres. Ce dispositif a l'avantage de présenter une large amplitude de fertilité sur une surface réduite. Rappelons enfin que la position de tous les arbres du dispositif a été cartographiée et que ce travail constitue une base précieuse pour l'étude des phénomènes de compétition entre arbres.

François COURBET - Frédéric JEAN
Unité de Recherches forestières méditerranéennes
INRA
Avenue Antonio Vivaldi
F-84000 AVIGNON
(courbet@avignon.inra.fr)

Nicolas LAUGIER
Stagiaire BTSa "Gestion forestière"
du CEFA de Montélimar
11, rue Arago
F-84000 AVIGNON

Helfried OSWALD
Directeur de Recherches INRA (e.r.)
16, rue Velouterie
F-84000 AVIGNON

Michel RAVART
Unité Croissance, Production et Qualité des Bois
INRA
F-54280 CHAMPENOUX

Remerciements

Les auteurs remercient le service départemental de l'ONF de l'Orne pour sa collaboration efficace dans la gestion du dispositif, le personnel technique des équipes chargées du suivi et de la mesure de la croissance des peuplements forestiers expérimentaux à l'INRA d'Avignon et de Champenoux et les lecteurs dont les suggestions ont permis d'améliorer cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. — Norme française NF B 52-001. Règles d'utilisation du bois dans les constructions. Classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues. — AFNOR, 1998. — 14 p.
- BOULET-GERCOURT (B.), NEPVEU (G.). — Relations entre certaines propriétés du bois et les fentes des arbres sur pied chez *Abies grandis* (Lindl.). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 45, n° 1, 1988, pp. 33-51.
- BRGM. — Carte géologique de la France à 1/50 000. Feuille d'Alençon, n° 251 (XVII-16) et notice explicative 70 p. — 1982.
- COURBET (F.). — Tables de production pour l'Épicéa de Sitka en Bretagne. — *Revue forestière française*, vol. XXXIX, n° 6, 1987, pp. 497-511.
- COURBET (F.), PICHARD (G.). — L'Épicéa de Sitka en Bretagne : tarifs de cubage. — Rennes : Centre régional de la Propriété forestière de Bretagne, 1986a. — 16 p. + annexes (Document à distribution limitée).
- COURBET (F.), PICHARD (G.). — Tarifs de cubage pour l'Épicéa de Sitka en Bretagne. Mode d'emploi et précautions d'utilisation. — Rennes : Centre régional de la Propriété forestière de Bretagne, 1986b. — 18 p.
- CHOLLAT (R.), GUILLOT (J.-L.). — Épicéa de Sitka de Bretagne : utilisable en structure. — *CTBA INFO*, n° 74, 1998, pp. 2-7.
- CTBA. — Étude des caractéristiques mécaniques de l'Épicéa de Sitka en Bretagne. Rapport final. — Paris : Centre technique du Bois et de l'Ameublement, 1998. — 70 p.
- DHÔTE (J.-F.). — Effets des éclaircies sur le diamètre dominant dans des futaies régulières de Hêtre ou de Chêne sessile. — *Revue forestière française*, vol. XLIX, n° 6, 1997, pp. 557-578.
- HAMILTON (G.J.), CHRISTIE (J.M.). — Forest management tables (metric). — *Forestry Commission Booklet*, n° 34, 1971, 200 p.
- HAMILTON (G.J.), CHRISTIE (J.M.), EDWARDS (P.N.). — Yield models for forest management. — *Forestry Commission Booklet*, n° 48, 1981, 32 p. + tableaux.
- HOULLIER (F.), BOUCHON (J.), BIROT (Y.). — Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers : état et perspectives. — *Revue forestière française*, vol. XLIII, n° 2, 1991, pp. 87-108.
- JABIOL (B.). — Les stations forestières en forêt domaniale d'Écouves (Orne). — Office national des Forêts - Direction régionale de Normandie, 1982. — 46 p.
- NEPVEU (G.), BLACHON (J.-L.). — Largeur de cerne et aptitude à l'usage en structure de quelques conifères : Douglas, Pin sylvestre, Pin maritime, Épicéa de Sitka, Épicéa commun, Sapin pectiné. — *Revue forestière française*, vol. XLI, n° 6, 1989, pp. 497-506.
- OSWALD (H.), AUSSENAC (G.). — Stabilité des peuplements et traitements sylvicoles sur sols hydromorphes. In : Séminaire Commission d'Agrométéorologie "Conditions et effets des excès d'eau en agriculture", 9-11 octobre 1985, Paris, France. — Paris : INRA-Éditions "Commission d'Agrométéorologie", 1987. — pp. 145-157.
- PARDÉ (J.), BOUCHON (J.). — Dendrométrie. — 2^e édition. — Nancy : École nationale du Génie rural, des Eaux et des Forêts, 1988. — 328 p.
- RIOU NIVERT (P.), coord. . — Dossier : stabilité des peuplements. — *Forêt-Entreprise*, n° 139, 2001, pp. 13-52.
- SERRIÈRE-CHADŒUF (J.). — Production et sylviculture de l'Épicéa de Sitka en France. — *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° 2, 1986, pp. 140-148.
- TOURRET (V.). — Les enseignements sylvicoles tirés de la tempête bretonne et normande du 15 octobre 1987. — *Forêt-Entreprise*, n° 60, 1989, pp. 23-28.
- VEYRON (N.). — Épicéa de Sitka breton : un bois pour la construction. — *Le Bois national, Édition Menuiserie*, n° 11, 1999, pp. 9-10.

SYLVICULTURE, CROISSANCE ET PRODUCTION DE L'ÉPICÉA DE SITKA. PREMIERS RÉSULTATS DU DISPOSITIF EXPÉRI-MENTAL D'ÉCOUVES (ORNE) (Résumé)

Le dispositif d'Écouves, installé en 1966, compare six traitements sylvicoles répétés en trois blocs complets assez différents sur le plan de leur fertilité. Cet article présente les résultats obtenus lors de l'analyse des inventaires successifs de 1974 à 1998.

La production totale en volume suit une relation unique en fonction de la hauteur dominante quels que soient la fertilité et le traitement sylvicole appliqué, confirmant en cela la loi de Eichhorn. On peut quand même noter une légère perte de production pour le traitement incluant les éclaircies les plus fortes. Cette relation prédit des volumes inférieurs à ceux obtenus à partir de la relation établie pour la Bretagne. La production totale en surface terrière en fonction de la hauteur dominante suit une relation unique quel que soit le traitement sylvicole mais présente des niveaux légèrement différents selon les blocs.

La fertilité et les éclaircies stimulent la croissance en diamètre des arbres d'avenir (250 à l'hectare) et des arbres dominants. Les éclaircies, contrairement à la fertilité stationnelle, sont par contre sans influence sur la croissance en hauteur. L'enlèvement des petites tiges dominées, dans une éclaircie faite au profit de 250 arbres d'avenir, est aussi sans influence sur leur croissance.

Des éclaircies fortes et précoces diminuent le risque de chablis en réduisant l'élancement des arbres et en abaissant l'âge d'exploitabilité. La diminution de la densité des peuplements ainsi que l'augmentation de la fertilité favorisent la production de bois à cernes larges. Une sylviculture à faible densité sur bonne station peut conduire à dépasser la limite supérieure de largeur de cerne (10 mm) admise pour une utilisation en structure. Ce risque doit être encore quantifié.

SILVICULTURE, GROWTH AND PRODUCTION OF SITKA SPRUCE – PRELIMINARY RESULTS FROM THE ECOUVES EXPERI-MENTAL SCHEME (Abstract)

The Ecouves experimental scheme, which was set up in 1966, is designed to compare six repeated silvicultural treatments, divided into three complete, but fairly different blocks in terms of fertility. This article presents the results obtained from the analysis of successive inventories from 1974 to 1998.

Overall production by volume obeys the same function of the dominant height, whatever the fertility and the silvicultural treatment in compliance, hence, with Eichhorn's law. Somewhat lower production is however noticeable in the treatment that includes the most extensive thinning. Volumes predicted using this relation are lower than those obtained using the relation established for Brittany. Total production per basal area as a function of the dominant height follows the same pattern whatever the silvicultural treatment, but levels are slightly different depending on the block.

Fertility and thinning stimulate girth growth of growing stock (250 per hectare) and of dominant trees. Thinning, in contrast to site fertility, has no influence on height growth. Removal of small understorey stems during a thinning operation involving 250 growing stock trees had no influence on their growth either.

Intensive, early thinning decreases the risk of windthrows by producing stockier trees and accelerating their maturity. Less densely populated stands together with higher fertility foster thicker growth layers. Low-density treatment on favourable sites can lead to growth rings that overshoot the upper limit (10 mm) allowed for structural wood. This risk has yet to be quantified.
